

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ROKO IVACI

GEOFIZIČKE METODE VIŠOKE REZOLUCIJE I PRIMJENA U
INŽENJERSTVU OKOLIŠA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

GEOFIZIČKE METODE VISOKE REZOLUCIJE I PRIMJENA U
INŽENJERSTVU OKOLIŠA

KANDIDAT:

ROKO IVACI

MENTOR:

Doc.dr.sc. MARIO GAZDEK

VARAŽDIN, 2018.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: ROKO IVACI

Matični broj: 2545 - 2015./2016.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

GEOFIZIČKE METODE VISOKE REZOLUCIJE I PRIMJENA U
INŽENJERSTVU OKOLIŠA

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Visoka rezolucija
3. Geofizičke metode visoke rezolucije
4. Primjena u inženjerstvu okoliša
5. Zaključak
6. Literatura
7. Popis slika
8. Popis tablica

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 11.07.2018.

Rok predaje: 06.09.2018.

Mentor:

Doc.dr.sc. Mario Gazdek



Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

GEOFIZIČKE METODE VISOKE REZOLUCIJE I PRIMJENA U INŽENJERSTVU
OKOLIŠA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Maria Gazdeka.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 06.09.2018.

ROKO NACI

26473085761

Edo Lu

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Visoka rezolucija.....	2
3. Geofizičke metode visoke rezolucije.....	3
3.1. Seizmičke metode.....	4
3.1.1. Seizmička refrakcija (SRefr).....	4
3.1.2. Spektralna analiza površinskih valova (SASW).....	6
3.2. Metoda geoelektrične tomografije (ERT).....	8
3.3. Georadar (GPR)	10
4. Primjena u inženjerstvu okoliša.....	13
4.1. Geoelektrična karakterizacija odlagališta otpada od maslinovog ulja.....	14
4.2. Primjena geofizičkih metoda inženjerstva okoliša u cestogradnji.....	15
4.3. Istraživanje pojave likvefakcije.....	16
5. Zaključak.....	20
6. Popis literature.....	21
7. Popis slika.....	22
8. Popis tablica.....	23

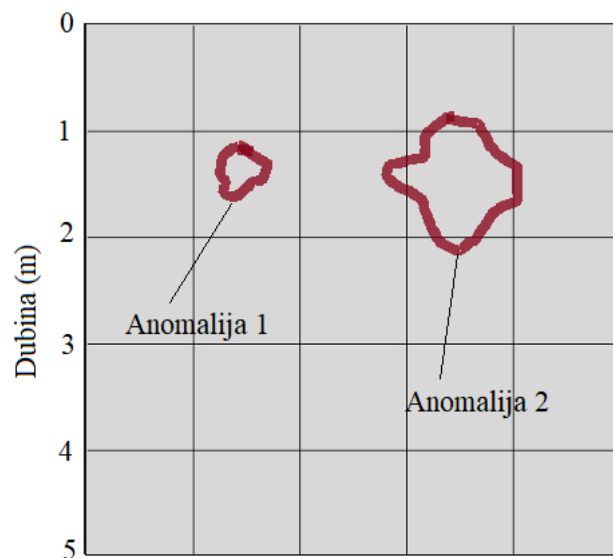
1. UVOD

Geofizičke metode su vrlo moćni alati za istraživanje plitkih slojeva tla i površinskih zona stijenskih masa. Baš ti slojevi i trošne zone u stijenama predstavljaju predmet interesa inženjerstva okoliša, jer se većina antropogenih procesa događa do dubine 50 m. Zbog prirode problema kojima se bavi, inženjerstvo okoliša zahtjeva detaljniju „sliku“ plićeg sloja tla. Da bi se dobili takvi rezultati istraživanja, koriste se geofizičke metode visoke rezolucije. U inženjerstvu okoliša, geofizičkim metodama se uspješno rješavaju problemi koji su nastali tijekom građevinskih radova te se bave problematikom primjerice pojave klizišta, odrona, urušavanja podzemnih prostorija ili kolapsa formacija u kršu. Te metode koriste se u istraživanjima koja se odnose na otkrivanje zakopanog otpada, pronalazak lokacije vodonosnika, detekciju onečišćenja u istom, procjenu rizika likvefakcije, istraživanje novih potencijalnih odlagališta nuklearnog i kemijskog otpada te otkrivanje arheoloških nalazišta. Ovaj rad se temelji na proučavanju četiri geofizičke metode visoke rezolucije koje se najčešće primjenjuju: seizmička refrakcija, spektralna analiza površinskih valova, metoda geoelektrične tomografije te georadar. Rezolucija istraživanja se uvijek odnosi na dimenzije istražnog prostora i domet (najčešće dubinu zahvata) neke geofizičke metode. Na primjer, seizmolozi koriste prostor udaljenost-vrijeme, koji se mjeri u kilometrima i sekundama, dok se u inženjerstvu okoliša koriste seizmičke metode, a jedinice za mjerenje udaljenosti i vremena su metri i milisekunde. U ta se dva područja koriste iste fizikalne osnove i principi, no odmah se može uočiti da je prostor istraživanja u plitkoj seizmici milijun puta manji. S istim zahtjevima rezolucije analogno bi razlučivost plitkih seizmičkih metoda trebala biti milijun puta veća. Cilj istraživanja je pokazati primjerenost geofizičkih metoda u inženjerstvu okoliša te utvrditi njihovu rezoluciju s obzirom na namjenu, ciljeve i objekte interesa u inženjerstvu okoliša.

2. VISOKA REZOLUCIJA

Rezolucija je širok pojam i može imati različita značenja kada se koristi u različitim tehnološkim područjima. U geofizici se pojam visoke rezolucije počeo upotrebljavati 1960-ih godina, kada su se geofizičke seizmičke metode koristile u moru da bi se dobila opsežna slika morfologije morskog dna i osnovne plitke stratigrafije. Svrha tih istraživanja je asistiranje kod dizajniranja i instalacije različitih vodova na dno, kao što su bušotine, platforme za proizvodnju nafte, naftovodi,... Takvi objekti su dizajnirani da izdrže u jako nepovoljnim uvjetima. Trpe nalete olujnih valova, jakih morskih struja te nestabilne uvjete morskog tla i morskih dubina. Da bi se stvorio dobar temelj za takve građevine, jako je bitno da topografija i fizikalna svojstva morskog dna budu dobro razumljiva. Također se pojavljuju hazardi i ljudske pogreške koji mogu uzrokovati veliku štetu. Npr. plitke akumulacije plina pod visokim pritiskom ili prisutnost različitih otpada kao što su izgubljeni dijelovi opreme za bušenje. Manjak pažnje na takve značajke može dovesti do razaranja naftnih platforma i ispuštanje velikih količina ugljikovodika u more. U takvim istraživanjima pojam visoke rezolucije je bio definiran kao istraživanja u kojima seizmički odašiljači i prijemnici rade na frekvenciji većoj od 100 Hz.[1] Iz naftne industrije, u kojoj se istraživanja odvijaju u velikim dubinama, u kojima je tražena razlučivost reda veličine 1 m na 5000 m dubine, metode visoke rezolucije počele su se koristiti u plićim dijelovima tla. Budući da se većina antropogenih aktivnosti odvija na dubini do 50 m, taj prostor je predmet interesa inženjerstva okoliša. Intencija je da se, što je moguće prije i lakše, primjenom geofizičkih metoda uoče anomalije koje su reda veličine 100 cm² ili manje. Budući da je u naftnoj industriji vertikalna razlučivost bila 1 m na 5000 m dubine (omjer je 0,0002), a u inženjerstvu okoliša se traži vertikalna rezolucija od „samo“ 0,1 m na 50 m dubine (omjer je 0,002), može se zaključiti da se metode koncipirane za istraživanje ugljikovodika itekako mogu uspješno primijeniti za istraživanja geomedija blizu površine. Vrlo je vjerojatno da se još dugo vremena neće dostići rezolucija naftnih istraživanja zbog velike količine novaca koji se ulaže u potrazi za fosilnim gorivima (deseci milijardi dolara).

Da bi se bolje pojasnio sam pojam rezolucije, interpretacija vertikalne rezolucije 1 m na 5 m dubine (omjer 0,2) prikazuje Slika 1. Anomalija 1 je premala (<1 m vertikalno) da bi bila vidljiva mjernom sustavu rezolucije od 20% dubine, dok je anomalija 2 dovoljno velika da bi ju takav sustav „prepoznao“, odnosno registrirao.



Slika 1. Prikaz vertikalne rezolucije omjera 0,2

Danas se pojam „visoka rezolucija“ u inženjerstvu okoliša, ali i u drugim inženjerskim granama gotovo više i ne koristi, jer se podrazumijeva da se u istraživanjima cilja se na manje dubine te veće rezolucije.

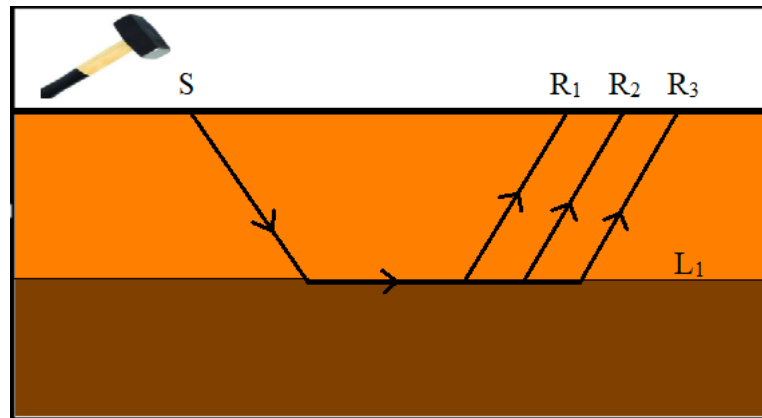
3. GEOFIZIČKE METODE VISOKE REZOLUCIJE

U ovom poglavlju opisane su četiri geofizičke metode, o kojima je napisano najviše znanstvenih radova i članaka, u inženjerstvu okoliša, a to su seizmička refrakcija (engl. Seismic refraction - SRef), spektralna analiza površinskih valova (engl. spectral analysis of surface waves - SASW), metoda električne tomografije (engl. electrical resistivity tomography - ERT) i georadar (engl. ground penetrating radar - GPR).

3.1. Seizmičke metode

3.1.1. Seizmička refrakcija (SRef)

Princip rada: akustični impulsi generirani su na unaprijed određenim mjestima izvora (S), duž duljine refrakcijskog seizmičkog profila. Mjeri se vrijeme putovanja akustične energije koja je bila refraktirana od plohe (L_1), a mjeri se na unaprijed određenim lokacijama prijemnika (R). Mjereno vrijeme se koristi pri računanju brzine/strukture plitkog podzemlja duž seizmičkog profila. [3]

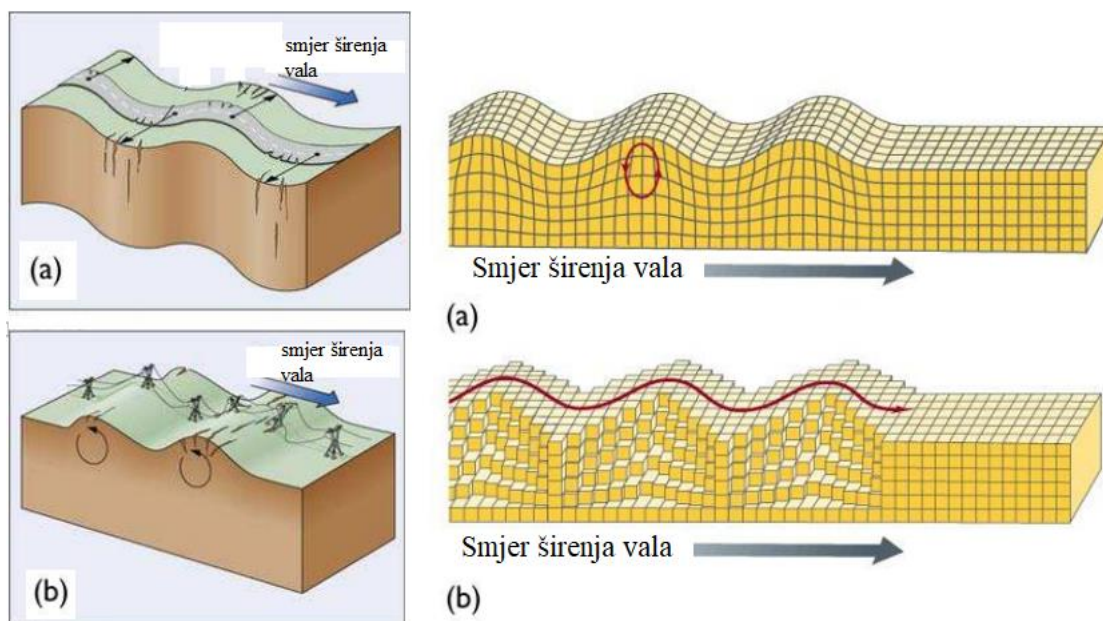


Slika 2. Princip rada seizmičke refrakcije

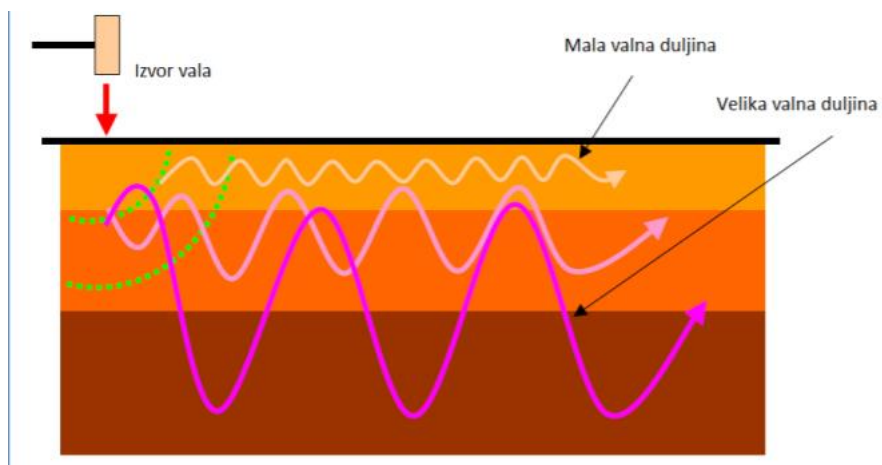
Metoda se temelji na činjenici da različiti geomaterijali imaju različita svojstva kao što su gustoća, poroznost, propusnost i zbijanje što se može prepoznati i zabilježiti kod seizmičkih mjerenja. Plitka seizmička istraživanja koriste prenosive seizmičke sustave koji se sastoje od ograničenih broja kanala, geofona i relativno slabog i jeftinog površinskog izvora (teži čekić). Takva istraživanja su relativno brza, jeftina i potrebno je dvoje ljudi za mjerenje. Međutim seizmička refrakcija funkcionira jedino pod uvjetom da se brzina putovanja valova povećava s dubinom te koristi samo vrijeme putovanja valova od odašiljača do prijemnika. Sve ostale podatke koje valovi nose su isključeni (amplituda i frekvencija), tako da je krajnji model dosta siromašan i ograničen informacijama, osim ako se ne proglašuje geostatističkim metodama. Da bi se definirala primjenjivost seizmičke refrakcije u inženjerstvu okoliša, treba razmotriti koja će fizikalna svojstva ciljevi, odnosno objekti koji se istražuju učiniti vidljivima. Bilo koja anomalija brzine (i/ili impedancije) koja se smatra objektom interesa može se detektirati plitko pod površinom (od 2 pa čak do 100 m). Metoda seizmičke refrakcije može se uspješno primijeniti za stratigrafsko kartiranje, određivanje dubine matične, svježe stijene, lociranje diskontinuiteta i detektiranje odlagališta otpada. Ovom metodom može se postići dubina zahvata od 10 do 20% dubine. [2,15] Rezolucija najčešće ovisi o razmaku između seizmičkih senzora (geofona), u pravilu se uzima da je vertikalna rezolucija 30 do 50% njihovog razmaka (ako je razmak primjerice 1 m, onda je rezolucija ili vertikalna vidljivost, 30 do 50 cm). Geostatističkim proglašivanjem mreže točaka, može se na kraku dosegnuti rezolucija znatno ispod 100 cm^2 (mreža od primjerice kvadrata duljine stranice 7 cm).

3.1.2. Spektralna analiza površinskih valova (SASW)

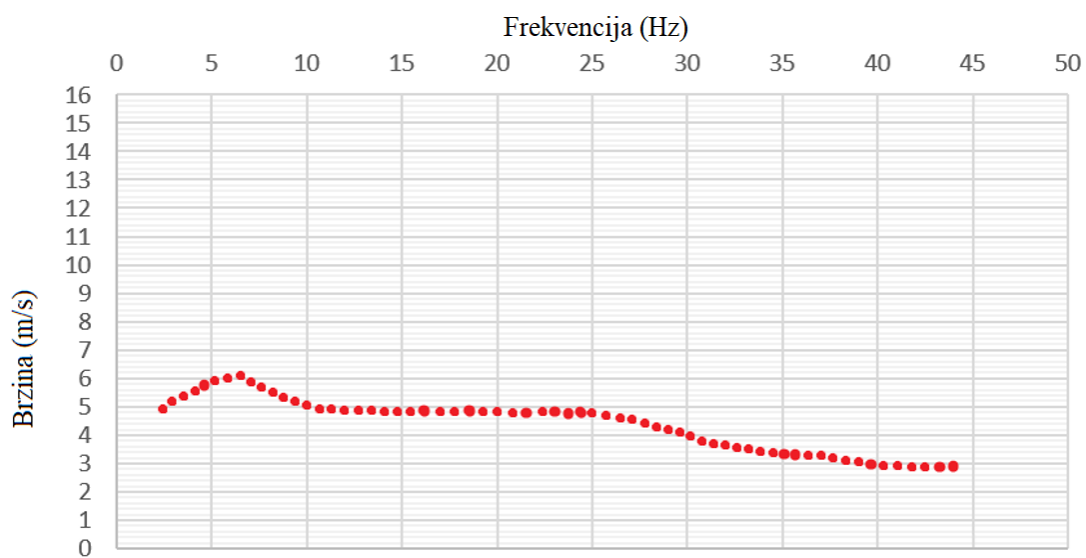
Princip rada: površinski valovi (Rayleighovi u kojima se čestice gibaju u vertikalnoj ravnini, po eliptičnoj putanji, u smjeru obrnutom od širenja vala i/ili Loveovi valovi u kojima se čestice gibaju u horizontalnoj ravnini, okomito na smjer širenja vala, Slika 3.) imaju svojstvo disperzije (rasipanje energije ovisno o frekvenciji), što znači da valovi različite valne duljine imaju različitu energiju i dubinu prodiranja i prema tome različitu brzinu širenja, Slika 4. Mjerenjem valova različitih frekvencija i valnih duljina (stvaranje disperzijske krivulje, Slika 5.) mogu se odrediti mehanička svojstva tla na različitim dubinama, Slika 6., ovisna o brzinama kompresijskih, odnosno posmičnih valova. Karakteristična brzina je brzina koja se mijenja s obzirom na različita svojstva tla (elastična svojstva i gustoća), a može se odrediti mjerenjem signala primljenih na nizu geofona. Nakon određivanja profila brzine valova po dubini, može se izračunati Youngov modul. 1D profil se može odrediti za svaki susjedni par geofona te se njihovom kombinacijom mogu dobiti slike poprečnog 2D presjeka svojstava geomedija. Slično tome se mogu kombinirati i susjedni 2D presjeci s čijom kombinacijom se dobije pseudo 3D slika. [2,12]



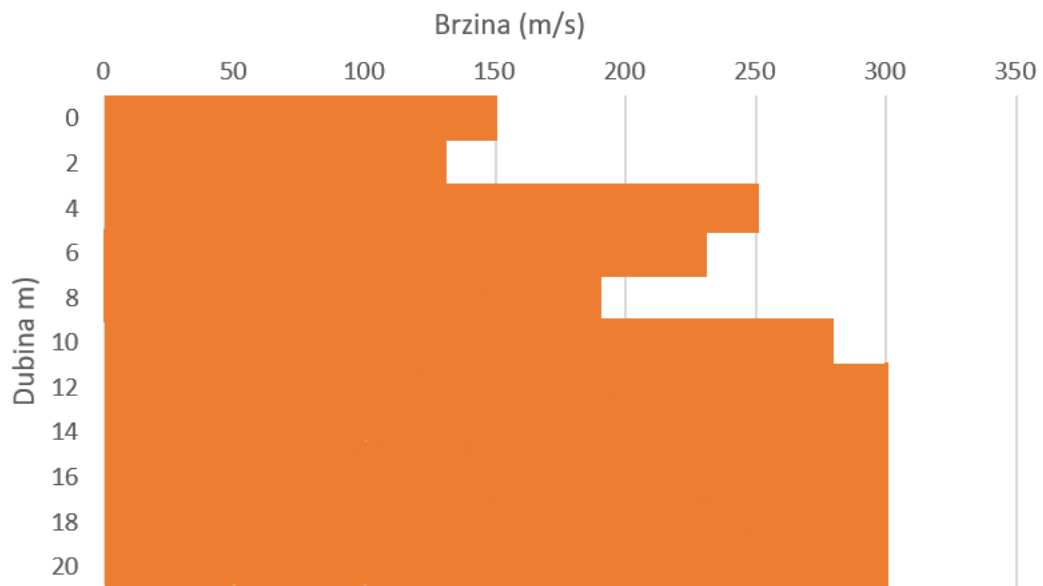
Slika 3. a) Rayleighovi valovi i b) Loveovi valovi [4]



Slika 4. Disperzija površinskih valova ovisno o frekvenciji i valnoj duljini [12]



Slika 5. Stvaranje disperzijske linije/krivulje koja nam prikazuje odnos brzine i frekvencije [2]

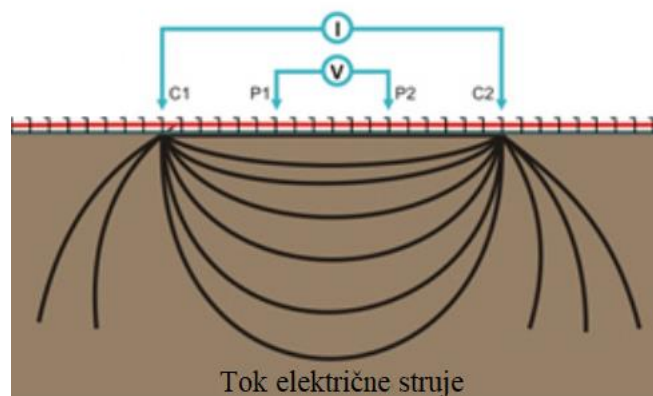


Slika 6. Konačan prikaz odnosa brzine valova i dubine, nakon inverzije disperzijske krivulje [2]

SASW metoda se koristi u svrhe stratigrafskog mapiranja, procjene dubine matične stijene, pronalaska odlagališta otpada te proučavanja krutosti tla. Pomoću ove metode može se i kvantitativno odrediti vrijednosti mehaničkih svojstava tla i stijena (npr. elastična svojstva, gustoća, položaj anomalija, ...). Danas su dostupni mnogi komercijalizirani softveri i koraci u računanju mogu biti potpuno automatizirani, što čini ovu metodu lakom za koristiti. Međutim, zbog disperzijskih svojstava površinskih valova rezolucija je jako ovisna o veličini anomalije: najmanja veličina koja može biti raspoznata je otprilike veličine jedne desetine dubine. [2]

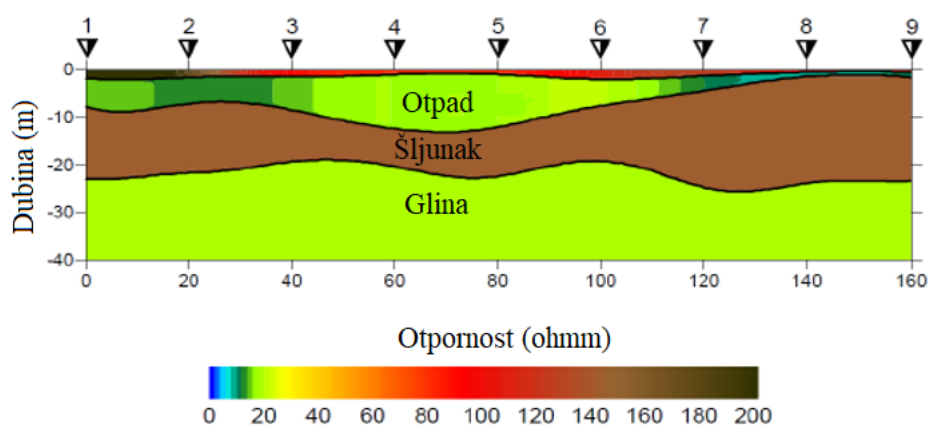
3.2. Metoda geoelektrične tomografije (ERT)

Princip rada: struja (I) se pušta u geomedij između uparenih strujnih elektroda C_1 i C_2 , a mjeri se razlika potencijala (ΔV) između uparenih potencijalnih elektroda P_1 i P_2 , Slika 7. Zatim se na temelju razlike potencijala, jačini struje i razmaku između elektroda računa prividna otpornost, primjenom Ohmovog zakona otpora ($R = \Delta V / I$).



Slika 7. Princip rada geoelektrične tomografije [14]

Električna svojstva tla mijenjaju se s obzirom na materijal koji se nalazi u tlu, s obzirom na zasićenost tla vodom te u prisutnosti zakopanih objekata. Tom se metodom pokušava rekonstruirati slika o vrstama i stanju tla temeljeno na promjenama električne vodljivosti koja je modelski promatra kao funkcija dubine i horizontalne udaljenosti, Slika 8.

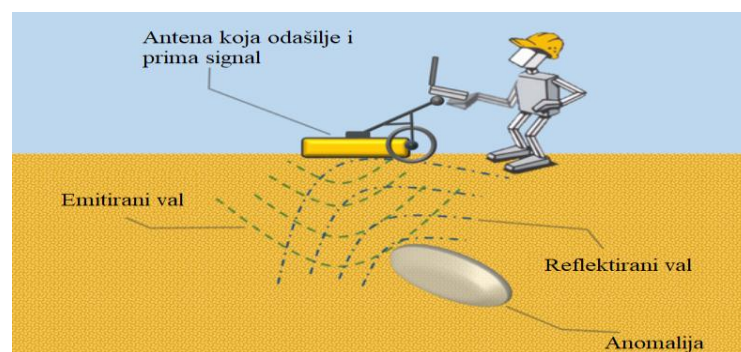


Slika 8. ERT profil odlagališta otpada [5]

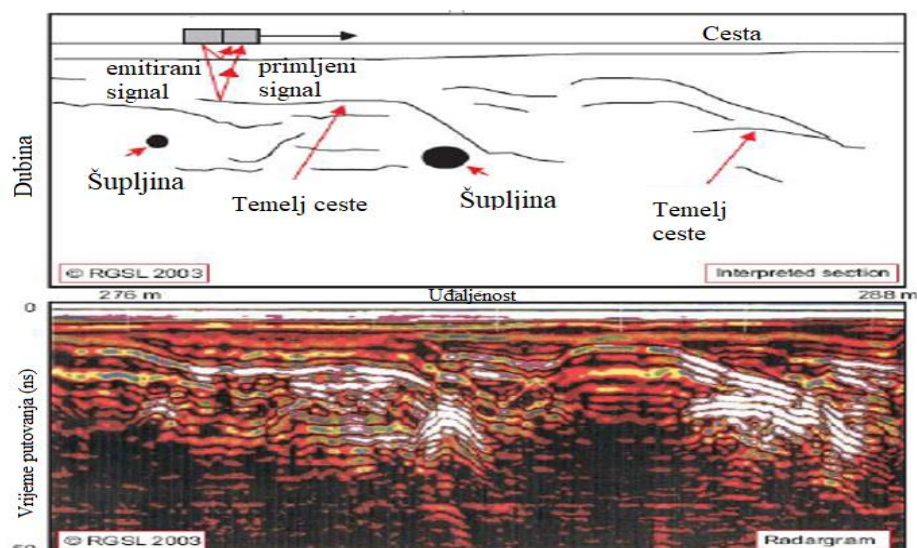
ERT metoda koristi se za detektiranje odlagališta otpada, mapiranje i monitoring onečišćenja, procjena dubine osnovne stijene, otkrivanje pukotina, Prednosti ove metode su, u usporedbi s ostalim geofizičkim metodama, kompaktna i lako prenosiva oprema, nakon mjerenja na terenu podaci se vrlo brzo obrađuju i interpretiraju. Za takvo istraživanje potrebne su tri osobe, a može se koristiti za duboka i plitka istraživanja. Dubina i rezolucija istraživanja ovisi o elektrodnom razmaku i jačini struje. Npr. primjenom dipolne konfiguracije elektroda, koristeći razmak elektroda od 10 m, moguće je otkriti zone anomalije dimenzija 2.5 m (25% razmaka elektroda). Manji razmak daje veću rezoluciju, ali smanjuje dubinu istraživanja i horizontalnu pokrivenost. Međutim, uvijek treba imati na umu da interpretacija područja istraživanja nikad nije jedinstvena (uvijek ista interpretacija bez obzira na konfiguraciju elektroda i metodu terenskog mjerenja) zbog kompleksnosti geološke građe. [2,6].

3.3. Georadar (GPR)

Princip rada: odašiljačka antena emitira puls elektromagnetske energije (val). Mjeri se vrijeme putovanja, od antene do neke anomalije te natrag do antene, i registrira se amplituda reflektiranog elektromagnetskog vala, Slika 9. Budući da je brzina vala poznata, pomoću dobivenih informacija o vremenu putovanja može se izračunati udaljenost anomalije od antene i generira se 2-D GPR profil, odnosno radargram, Slika 10. [3]

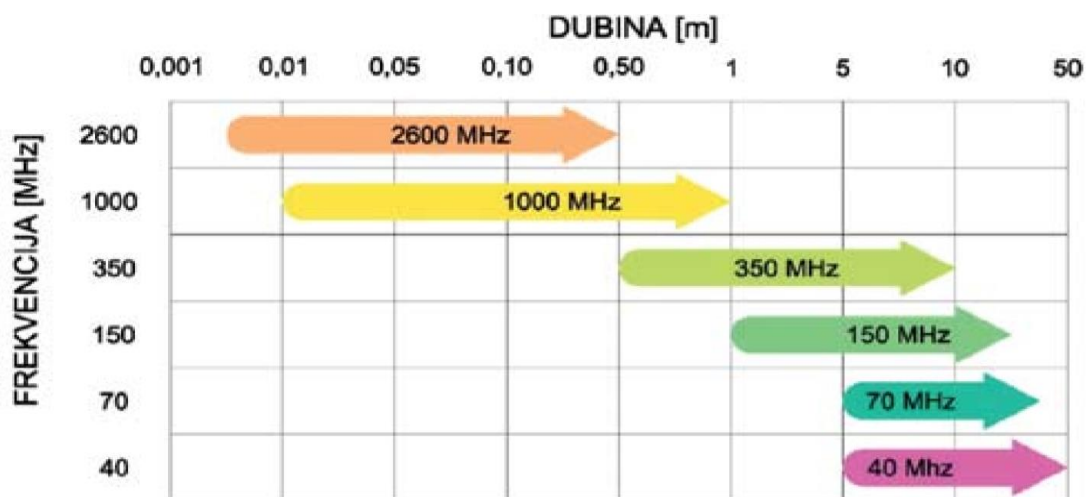


Slika 9. Princip rada georadara [13]



Slika 10. 2-D GPR profil i njegova interpretacija [7]

U komercijalnoj upotrebi GPR uređaji rade većinom u spektru frekvencija od 40 MHz do 3 GHz. Frekvencija antene glavni je parametar kojim se određuje penetracija i razlučivost GPR metode. Sustavi visokih frekvencija (veće od 1 GHz) daju odličnu razlučivost od svega nekoliko milimetra, dok sustavi niskih frekvencija mogu postići veću dubinu penetracije (do 50 m). Većom dubinom penetracije smanjuje se rezolucija. Rezolucija se smanjuje, jer medij kojim se val širi prigušuje signal, apsorbira energiju, a dolazi i do gubitaka tijekom refleksije vala [7]



Slika 11. Dubina penetracije GPR uređaja na pojedinim frekvencijama u vapnenačkoj stijeni [7]

GPR metoda se primjenjuje kod mapiranja plitke geološke strukture (stratigrafija, diskontinuiteti, šupljine, ...), za lociranje metalnih i nemetalnih infrastruktura (cijevi, spremnici, kabeli, ...) za detekciju odlagališta otpada te mapiranje arheoloških nalazišta.

GPR metoda može proizvesti detaljnu sliku vertikalne stratigrafije u rasponu dubine od 1.5 do 10 m. Georadarom se relativno jednostavno mogu otkriti dielektrični diskontinuiteti u tlu (zidovi, grobnice, podrumi, zbijeni sloj, šupljine,...), a može se veoma lako upotrebljavati u urbanim područjima. Međutim, sastav tla veoma utječe na dubinu penetracije. Npr., u suhi pijesak se lako prodire elektromagnetskim valovima, dok kroz glinu valovi teško prolaze zbog njene veće vodljivosti. Gruba procjena vertikalne rezolucije kreće se oko $\frac{1}{4}$ valne duljine centralne frekvencije. [2,7]

4. PRIMJENA U INŽENJERSTVU OKOLIŠA

U ovom poglavlju opisane su tri studije slučaja (engl. case study) u kojima su se koristile navedene metode.

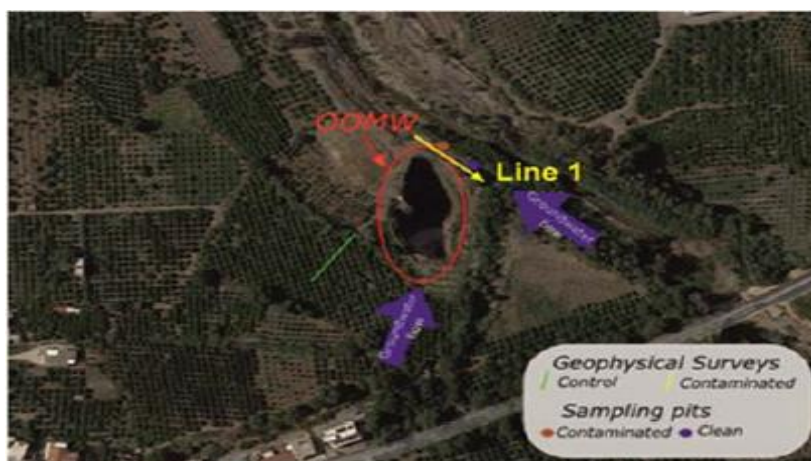
1. Geoelektrična karakterizacija odlagališta otpada od proizvodnje maslinovog ulja [2]
2. Primjena inženjerstva okoliša u cestogradnji [2]
3. Istraživanje pojave likvefakcije [9]

Tablica 1. Opis geofizičkih metoda te njihova ograničenja i primjena u inženjerstvu okoliša [2]

Metoda	Primjena	Ograničenja
SReF Seizmička refrakcija	<ul style="list-style-type: none">- pronalazak odlagališta otpada- procjena dubine temeljne stijene- stratigrafsko mapiranje- lociranje diskontinuiteta	<ul style="list-style-type: none">- brzina valova mora se povećavati s dubinom
SASW Spektralna analiza površinskih valova	<ul style="list-style-type: none">- procjena dubine osnovne stijene- detekcija odlagališta otpada- proučavanje krutosti tla- stratigrafsko mapiranje	<ul style="list-style-type: none">- smanjena rezolucija povećanjem dubine
ERT Geoelektrična tomografija	<ul style="list-style-type: none">- monitoring onečišćenja- lociranje odlagališta otpada- procjena dubine osnovne stijene- lociranje pukotina	<ul style="list-style-type: none">- sporo prikupljanje podataka
GPR Georadar	<ul style="list-style-type: none">- mapiranje plitke geološke strukture- lociranje metalnih i nemetalnih objekata- pronalazak odlagališta otpada	<ul style="list-style-type: none">- težak prolazak valova kroz neka tla (npr. glina)

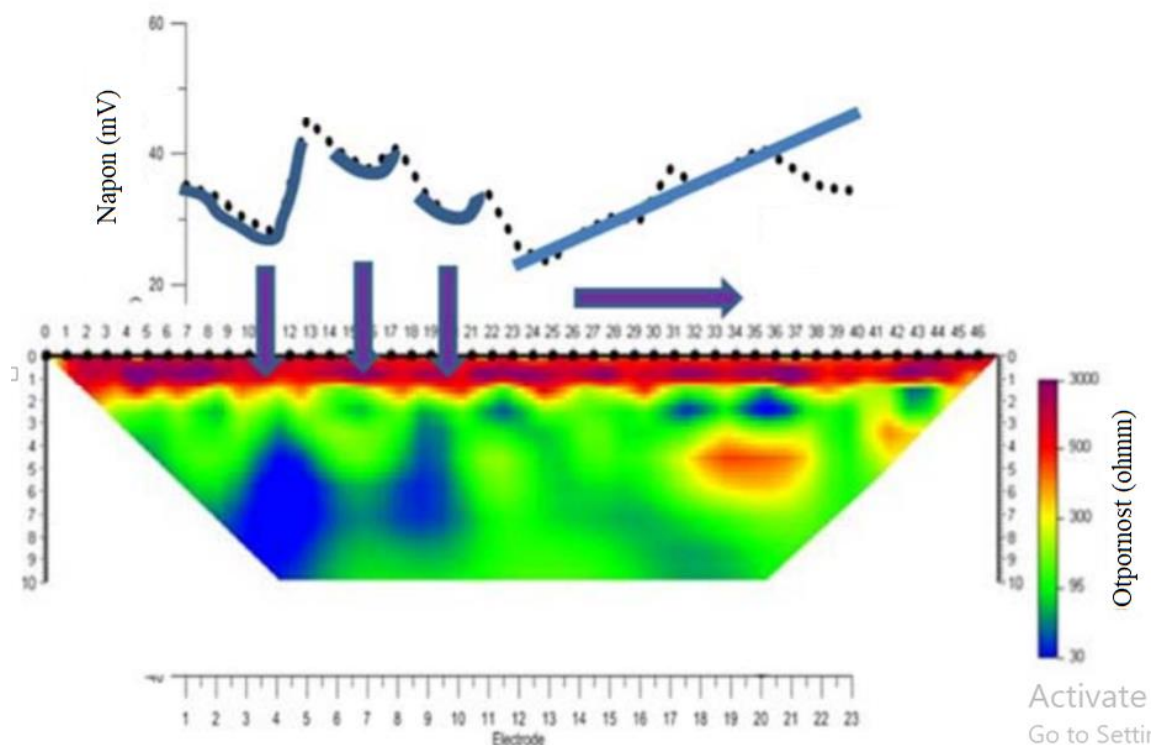
4.1. Geoelektrična tomografija odlagališta otpada od proizvodnje maslinovog ulja

Pozitivna i ljekovita svojstva maslinovog ulja su poznata, no manje je poznato da prilikom proizvodnje nastaje velika količina otpada. Takva vrsta otpada ima tamno smeđu boju, neugodan miris i veliki udio organskih spojeva (fenola i polifenola) [2]. Ne postoje zakonska ograničenja koja bi regulirala odlaganje otpada maslinovog ulja pa se takav otpad često odlaže blizu rijeka ili nekih propusnih geoloških formacija. Zbog toga uvijek postoji velika opasnost od onečišćenja podzemne vode i tla. ERT metoda može pružiti efikasan i neinvazivan monitoring promjene stanja okoliša, jer ova vrsta otpada ima dobru električnu vodljivost. Slika 12. pokazuje područje istraživanja na kojem se prati razina onečišćenja tla. To područje se uglavnom sastoji od aluvijalnih nanosa s promjenjivom vodopropusnosti. Na slici 12 prikazan je prostor (crvena linija), dimenzija 75 m x 25 m, namijenjen za odlaganje otpada nastalog proizvodnjom maslinovog ulja.



Slika 12. Proučavano područje odlagališta [2]

U istraživanju su korištene i ostale geoelektrične metode (metoda inducirane polarizacije i metoda vlastitog potencijala), ali ERT metoda je pokazala najbolje rezultate. Mjerenja su se izvodila duž 6 profila, no ovdje je prezentiran samo jedan. Slika 13. prikazuje interpretaciju ERT mjerenja na profilu duljine 45 m s dubinskim zahvatom od 10 m. Tlo se sastoji od površinskog sloja visoke otpornosti, koji je integriran s tankim, čvrstim i krutim podslojem od pijeska i šljunka do dubine od oko 2 m. Prema dnu profila vidljiva je anomalija vrlo male otpornosti nastala širenjem otpada od maslinovog ulja. Ova pretpostavka je potvrđena kemijskom i fizikalnom analizom uzoraka uzetih iz tog područja. Tvornice maslinovog ulja proizvode otpad koji ima veoma dobru električnu vodljivost pa se lako otkriva ERT metodom.



Slika 13. ERT profil odlagališta otpada od maslinovog ulja [2]

Dio s dobrom električnom vodljivošću (lijevi dio profila), obojen plavom bojom, pokazuje nam prisutnost otpada nastalog proizvodnjom maslinovog ulja. Ovo ERT istraživanje predviđa i daljnje kretanje (širenje) onečišćenja prema dolje (lijeva strana profila) te uzduž profila (desna strana profila). [2] Na profilu odlagališta otpada maslinovog ulja vidljive su anomalije od dimenzija od oko 0,5 metara na dubini od 3 metra, što nam govori da se postigla rezolucija od oko 17% dubine.

4.2. Primjena geofizičkih metoda inženjerstva okoliša u cestogradnji

Kombinacija detaljnog tektonskog i geološkog mapiranja, seizmičke refrakcije i georadara je primijenjena za otkrivanje kaverni u kršu te promjena stanja u stijenskoj masi koje su izazvale slom i kolaps dijelova ceste. ERT metoda je isključena zbog prisutnosti podzemnih cijevi za gorivo i zbog sigurnosnih razloga. Tlo se sastoji od okršanih vapnenaca sa šupljinama ispunjenima crvenicom. Geološko mapiranje pokazalo je dvije tektonske (zdrobljene) zone u tom području. Zone sloma su uglavnom utvrđene seizmičkom refrakcijom, dok su ERT i GPR metodom određene manje anomalije i šupljine u kršu, veće od 50 cm u promjeru. Takvo poremećeno stanje uglavnom je

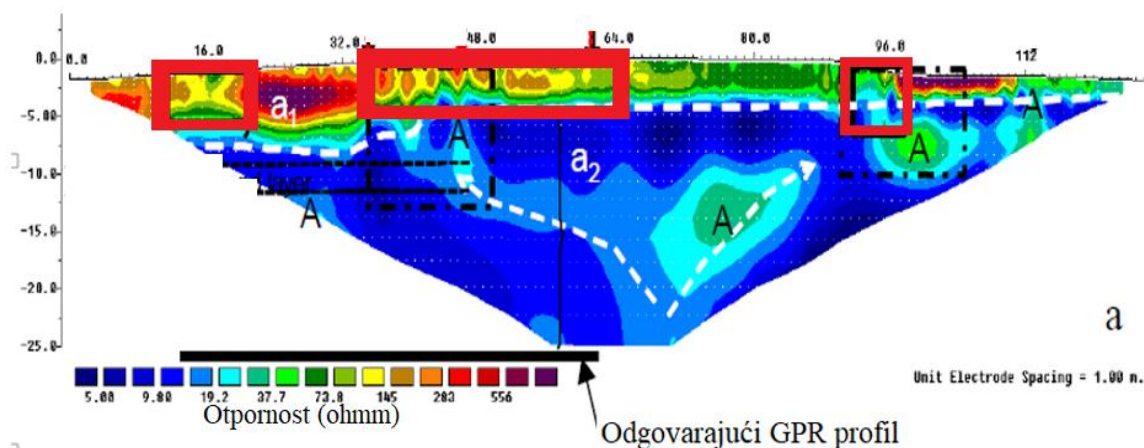
posljedica tektonskih i antropogenih utjecaja. Istočna strana ceste je većinom pod utjecajem tektonske aktivnosti (šupljine u kršu i tektonske zone) koje se nalaze na dubini od 0.7-2.8 m. Ova kombinacija (SRF i GPR) se pokazala uspješnim alatom za detektiranje stratigrafskih poremećaja. Detaljno geološko i tektonsko mapiranje, prije primjene geofizičkih metoda, je bilo jako bitno, jer je smanjilo vrijeme i troškove navedenih metoda.[2] Budući da su vidljive anomalije od 50 cm na 2,8 metara dubine, ovdje se postigla rezolucija od 18% dubine.

4.3. Istraživanje pojave likvefakcije

Na sjeveru Italije, u mjestima Sant'Agostino i Vigarano Mainarda, je 5.12.2012. godine izbio snažan potres čije su posljedice između ostaloga bile slom tla (pukotine velike širine i dubine) te hidraulički slom u sloju pijeska što je rezultiralo „erupcijom“ [9]. Ove pojave inducirane su likvefakcijom plitkog, vodom zasićenog pijeska zbog čega je nastalo oštećenje na nekoliko zgrada i duž ceste. Zakoni u Italiji zahtijevaju da građevine koje se grade u seizmički rizičnim zonama moraju imati i mape koje opisuju zone podložne likvefakciji. Mapiranja tih zona su provedena karotažnim metodama koje su osigurale dosta informacija i podataka o tlu i stanju u tlu. Međutim, budući da su rezultati tih metoda jednodimenzionalni (kao i sondažna geotehnička bušotina), nisu se horizontalno ekstrapolirali s istom rezolucijom i pouzdanošću (kao na koordinati bušotine). Pokazalo se da su bolje rješenje geofizičke metode visoke rezolucije koje su osjetljive na vrstu geomedija, poroznost i zasićenost vodom i koje bi omogućile bolje zoniranje područja podložnog likvefakciji [9]. U toj studiji koristile su se ERT i GPR metode, na dva područja istraživanja.

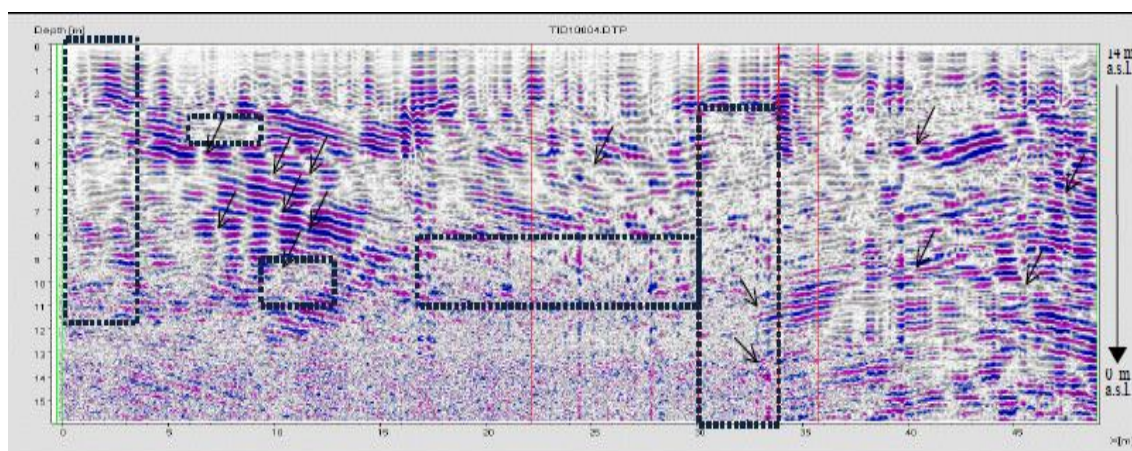
Područje istraživanja 1:

Istraživanje se provodilo ERT metodom duž 126 m profila s razmakom elektroda od 1 m, dok se za georadarsko profiliranje koristio GPR sustav s centralnom frekvencijom od 70 MHz, duž 50 m dugih profila. Slika 14. pokazuje rezultate ERT istraživanja, gdje su vidljive nepravilnosti na poziciji od 36 do 65 m profila i na dubini od 12 metara, te na poziciji oko 95-g metra profila. Te nepravilnosti označavaju područja s većom otpornošću, što ukazuje na prisutnost pijeska i poklapaju se s površinskim pukotinama koje je izazvala likvefakcija. Zgrada na oko 35 m profila je pretrpjela veliku štetu, a na 48 metara se dogodilo izbacivanje pijeska.[9]



Slika 14. ERT profil područja 1 s označenim vidljivim oštećenjima (crveni pravokutnici) [9]

GPR profiliranje se provelo 14-og i 64-og m ERT profila, do dubine od 15 m. Slika 15. prikazuje GPR profil područja 1. Kvadrati pokazuju zone u kojima je moguća likvefakcija.

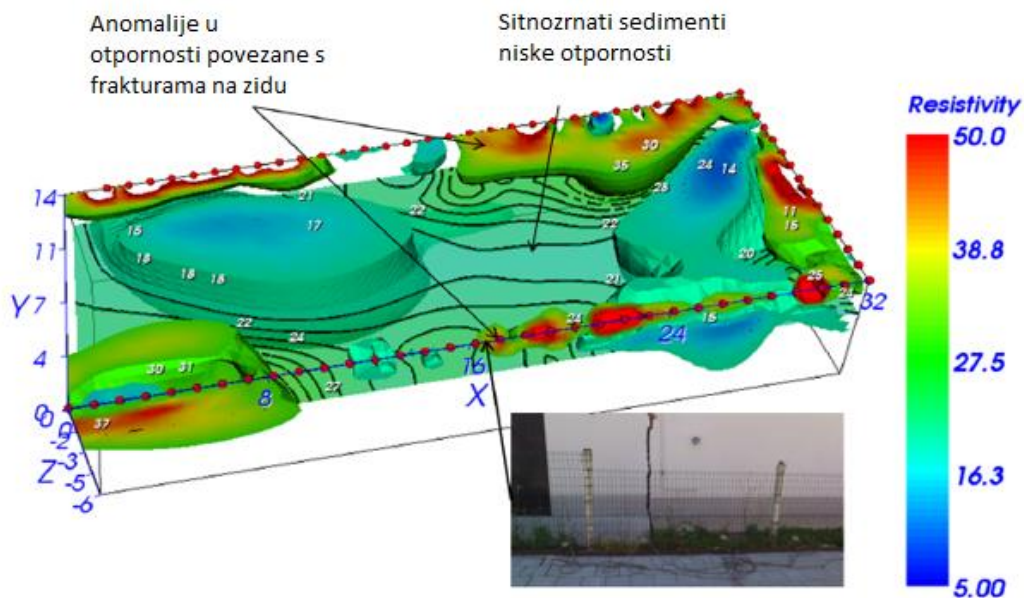


Slika 15. GPR profil područja 1 [9]

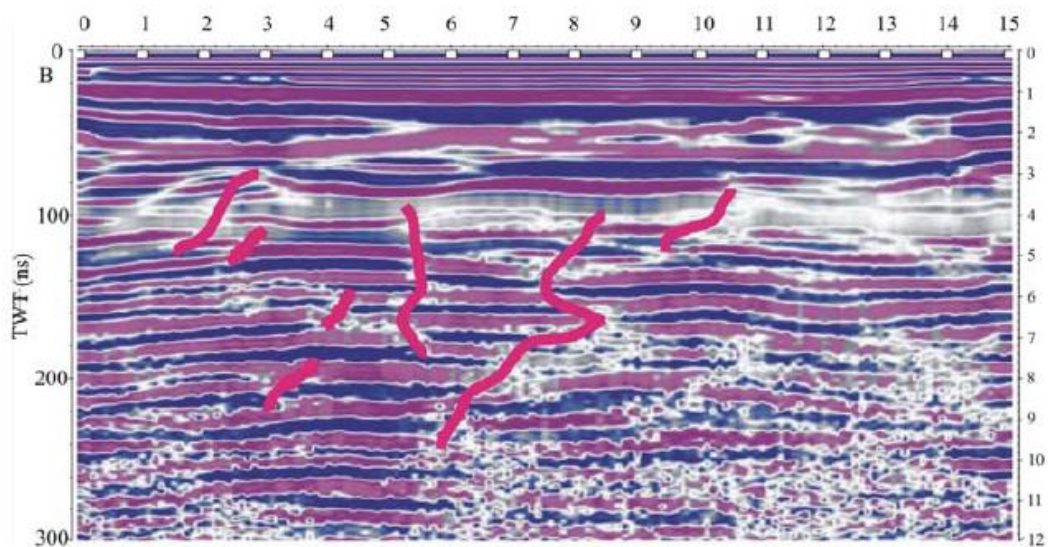
Područje istraživanja 2:

ERT i GPR profili su bili postavljeni oko zgrade. Elektrode su bile raspoređene oko zgrade na razmaku od jednog metra u obliku slova C (takvim rasporedom izbjegla se instalacija elektroda u samu zgradu), a GPR sustav je radio na frekvenciji od 100 MHz. U ovom slučaju, istraživanja tla ispod zgrade pokazuju malu otpornost (<20 ohma), što upućuje na prisutnost gline i praha. Slika 16. prikazuje anomalije na ERT profilu koje su izazvale pukotinu na zgradi. Na modelu tla su označene anomalije iznad fraktura na

zgradi. Anomalije odgovaraju pojavi saturiranog pijeska koji je glavni geomedij za pojavu likvefakcije (pijesak ima veću otpornost od gline i praha). [9]



Slika 16. ERT 3D model tla i fotografija frakture na zgradi (Područje istraživanja 2) [9]



Slika 17. GPR profil mjerenog područja 2. Debele crvene linije prikazuju podzemne pukotine koje su nastale nakon likvefakcije [9]

I ERT i GPR metode istraživanja su dale rezultate koji se poklapaju s prijašnjim karotažnim mjerenjima i vidljivim posljedicama koje je izazvala likvefakcija. GPR profili (Slika 15. i 17.) sadrže oko 45 linija na dubini od 12 m, što daje rezoluciju od oko 25% dubine. Takva rezolucija odgovara gruboj procjeni da razlučivost GPR-a iznosi $\frac{1}{4}$ valne

duljine. Slika 16. prikazuje ERT profil na kojem su vidljive najmanje anomalije od oko 1 m na dubini od 5 m, u tom slučaju razlučivost je 20% dubine.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio prezentirati koje su geofizičke metode primjenjive u inženjerstvu okoliša (i koje se često koriste) te procijeniti rezoluciju neke metode potrebnu za istraživanja. Rad se temelji na razmatranju četiri geofizičke metode visoke rezolucije koje se najčešće primjenjuju: seizmička refrakcija, spektralna analiza površinskih valova, metoda geoelektrične tomografije te georadar. U analiziranim istraživanjima iz publiciranih studija slučaja, postizala se rezolucija od 15 do 25% dubine što se pokazalo zadovoljavajuće za planiranje mjera sanacije ili remedijacije. Činjenica da se anomalije poklapaju s vidljivim posljedicama na površini i prijašnjim mjerenjima, govori da su ove metode itekako primjenjive u inženjerstvu okoliša. Tim se metodama može dovoljno detaljno prikazati slojevitost tla ili trošnost stijena na malim dubinama (uglavnom do 30 m, a rijetko do 50 m). Na tim se dubinama može očekivati veća heterogenost, diskontinuiranost i anizotropija, a geološke su formacije uglavnom kompleksne. Ta je površinska zona tla i stijena neposredno vezana s uz većinu ljudskih djelatnosti koje su predmet interesa inženjerstva okoliša. Geofizička istraživanja se provode relativno brzo, pokrivaju veliko područje i ekonomski su isplativa. Koristeći ove metode mogu se detektirati razne pojave i opasnosti iz domene inženjerstva okoliša, kao što su primjerice: pojava klizišta i odrona, slom tla i urušavanje, degradacija krških pojava, likvefakcija, detekcija nelegalnih odlagališta, položaj vodonosnika i stanje onečišćenja u njemu.

6. LITERATURA

1. Trabant P. Applied High-Resolution Geophysical Methods: Offshore Geoengineering Hazards, 1984.
2. Kokinou E, Soupios P. Environmental geophysics: Techniques, advantages and limitations, 2016.
3. Anderson N, Ismail A. A generalized protocol for selecting appropriate geophysical techniques, 2010.
4. Seizmički hazard. Dostupno na:
https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/10_seizmicki%20hazard.pdf
5. Szabö NP. Engineering and environmental geophysics, Lecture notes, University of Miskolc
6. Dominiković Alavanja S. Određivanje rezolucije 2-D električne tomografije. Magistarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2006.
7. Rukavina T. GPR – Ground penetrating radar u prospekciји ležišta arhitektonskog kamena. Klesarstvo i graditeljstvo, Pučišća, 2010. br.3-4
8. Yusuf TU. Overview of Effective Geophysical Methods Used in the Study of Environmental Pollutions by Waste Dumpsites, 2016.
9. Nasser AZ, Bignardi S, Baradello L, Nieto D. High resolution shallow geophysical methods for the investigation of the liquefaction phenomena: case study of the ML 5.9. May 20th, 2012 Emilia earthquake (Italy)
10. Cammarano F, Piro S, Patella D. Integration of high resolution geophysical methods. Detection of shallow depth bodies of archaeological interest, 1998.
11. Šumanovac F, Urumović K, Dragičević I. Hydrogeological mapping of a miocene aquifer by two-dimensional electrical imaging, 2003.
12. Jeđud B. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW). Diplomski rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Varaždin, 2010.
13. Ground penetrating radar. Dostupno na:
<http://www.munition.de/en/geophysics/georadar.html>
14. Electrical resistivity tomography. Dostupno na:
<https://www.terradata.co.uk/survey-methods/resistivity-tomography/>
15. Obermann A. Part 1: Seismic refraction

7. POPIS SLIKA

1. Prikaz vertikalne rezolucije omjera 0,2
2. Princip rada seizmičke refrakcije [3]
3. a) Rayleighovi valovi i b) Loveovi valovi [4]
4. Disperzija površinskih valova ovisno o frekvenciji i valnoj duljini [12]
5. Stvaranje disperzijske linije/krivulje koja nam prikazuje odnos brzine i frekvencije [2]
6. Konačan prikaz odnosa brzine valova i dubine, nakon inverzije disperzijske krivulje [2]
7. Princip rada geoelektrične tomografije [3]
8. ERT profil odlagališta otpada [5]
9. Princip rada georadara [3]
10. 2-D GPR profil [7]
11. Dubina penetracije GPR – uređaja na pojedinim frekvencijama u vapnenačkoj stijeni [7]
12. Proučavano područje odlagališta [2]
13. ERT profil odlagališta otpada od maslinovog ulja [2]
14. ERT profil područja 1 s označenim vidljivim oštećenjima [9]
15. GPR profil područja 1 [9]
16. ERT 3D model tla i fotografija frakture na zgradi (Područje istraživanja 2) [9]
17. GPR profil mjerenog područja 2. [9]

8. POPIS TABLICA

1. Geofizičke metode, kratak opis, primjena u inženjerstvu okoliša te njihova ograničenja

Sažetak:

U geofizici postoje metode kojima se istražuju plitki slojevi tla i površinske zone stjenjskih masa. Budući da se većina antropogenih procesa događa na dubini do 50 m, baš ti slojevi i zone predstavljaju predmet interesa inženjerstva okoliša. Zbog prirode problema kojima se bavi, inženjerstvo okoliša zahtjeva detaljniju „sliku“ plićeg sloja tla. Da bi se dobili takvi rezultati istraživanja, koriste se geofizičke metode visoke rezolucije. Ovaj rad se temelji na proučavanju četiri geofizičke metode visoke rezolucije koje se najčešće primjenjuju: seizmička refrakcija, spektralna analiza površinskih valova, metoda geoelektrične tomografije te georadar. Cilj istraživanja je pokazati primjerenost geofizičkih metoda u inženjerstvu okoliša te utvrditi njihovu rezoluciju s obzirom na namjenu, ciljeve i objekte interesa u inženjerstvu okoliša.

Ključne riječi: geofizičke metode, visoka rezolucija, inženjerstvo okoliša